

DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN VILLAVICENCIO¹



KATHERINNE PAOLA MORALES RODRÍGUEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**ESPECIALISTA EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE
RECURSOS NATURALES**

Director:

Ximena Lucía Pedraza Nájar

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE
RECURSOS NATURALES**

BOGOTÁ D.C., 2018

¹ Este artículo se refiere a “Propuesta de diseño de Humedales Artificiales para el tratamiento de lixiviados generados por la recolección de basuras en la ciudad de Villavicencio.”

DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN VILLAVICENCIO²

DESIGN OF ARTIFICIAL WETLANDS FOR THE TREATMENT OF LIXIVIATES IN VILLAVICENCIO

Katherinne Paola Morales Rodríguez
Ingeniera Ambiental
Facultad de Ingeniería
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, D.C., Colombia
u2700865@unimilitar.edu.co

RESUMEN

Los humedales artificiales, también conocidos como contruidos o de tratamiento, se presentan, en la actualidad, como una de las grandes alternativas verdes para el tratamiento de lixiviados, en aquellos rellenos sanitarios donde solo se cuenta con un proceso simple, convencional y/o su capacidad actual no permite el manejo adecuado del total de los mismos; es el caso del Relleno Sanitario “Parque Ecológico Reciclante” de la ciudad de Villavicencio. Este artículo se enfoca en una investigación de Estudio de Caso; en la metodología se realiza una búsqueda bibliográfica que permita determinar la necesidad del tratamiento adecuado de lixiviados en el relleno sanitario en mención y se proponen las especies vegetales viables para el tratamiento de estos residuos líquidos. Con la información obtenida se consolida la propuesta de diseño, y sus criterios, de este tipo de humedales en el relleno sanitario “Parque Ecológico Reciclante”, así como se ratifica la viabilidad y simplicidad de esta alternativa para depurar estas aguas y devolverlas a los afluentes que recorren la ciudad de manera limpia, favoreciendo la integración en el entorno y la naturalización del espacio.

Palabras claves: Humedales artificiales, Lixiviados, Relleno sanitario, Tratamiento, Villavicencio.

² Este artículo se refiere a “Propuesta de diseño de Humedales Artificiales para el tratamiento de lixiviados generados por la recolección de basuras en la ciudad de Villavicencio.”

ABSTRACT

The artificial wetlands, also known like constructed or of treatment, appear, at present, as one of the big green alternatives for the treatment of lixiviados, in those sanitary landfills alone where one possesses a simple, conventional process and / or his current capacity does not allow the suitable managing of the total of the same ones; it is the case of the Sanitary Landfill "Ecological Park Reciclante" of Villavicencio's city. This article focuses in an investigation of Study of Case; in the methodology there is realized a bibliographical search that allows to determine the need of the suitable treatment of lixiviados in the sanitary landfill in mention and they propose the vegetable viable species for the treatment of these liquid residues. With the obtained information the offer of design is consolidated, and his criteria, of this type of wetlands in the sanitary landfill "Ecological Park Reciclante", as well as there is ratified the viability and simplicity of this alternative to purify these waters and to return them to the tributaries that cross the city of a clean way, favoring the integration in the environment and the naturalization of the space.

Keywords: Artificial Wetlands, Lixiviates, Sanitary Landfill, Treatment, Villavicencio.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 30 años, Colombia ha presentado avances notables en cuanto al manejo y disposición final de residuos sólidos urbanos, propiciando una nueva cultura, que pasa de emplear las fuentes superficiales como receptoras únicas de los residuos, a una disposición controlada y técnica de éstos utilizando la tecnología de relleno sanitario [1].

Un relleno sanitario debe ser considerado como una estructura civil dinámica con comportamientos propios, debido a la complejidad de los procesos que se generan dentro de ella y a las acciones naturales y antrópicas a la que se encuentra expuesta durante las diferentes etapas de su consolidación [1, p. 1].

La descomposición de los residuos sólidos que se dispone en los rellenos sanitarios producen un líquido percolado o lixiviado, parecidas a las aguas domésticas, pero con concentraciones mayores de contaminantes. La generación de lixiviados en los rellenos sanitarios son de proporciones elevadas y en la actualidad se manejan distintos medios para su evacuación como son: La aspersión a cielo abierto, el tratamiento en lagunas de oxidación, entre otros [2].

El lixiviado generado es una corriente altamente contaminada con valores de DBO superiores a los 10000 mg/L, y en algunas oportunidades con importante cantidad de sólidos suspendidos. También, contiene contaminantes tales como amonio, nitritos, fenoles, grasas y metales pesados, y en algunos casos pueden existir trazas de pesticidas y herbicidas en ellos [1, p. 2].

Con el fin de evitar la contaminación de suelos y de fuentes de agua, tanto superficial como subterránea (acuíferos), los lixiviados deben ser recolectados y tratados en los rellenos sanitarios. Si el diseño de los rellenos no contempla el control de los lixiviados, además de contaminar el suelo por la infiltración de estos, puede ocasionar un colapso del sistema y causar una catástrofe sanitaria como la ocurrida, en septiembre de 1997, en el relleno sanitario Doña Juana, en la ciudad de Bogotá [3].

Así, para el caso de estudio, BIOAGRÍCOLA DEL LLANO S.A. E.S.P., empresa encargada de la recolección, transporte, almacenamiento y disposición final de basura del municipio de Villavicencio, que cuenta, actualmente, con un tratamiento de lixiviados simple y convencional, consistente en una planta de digestión anaerobia de flujo a pistón [4], tiene la necesidad de ponerse a la vanguardia en nuevas y mejoradas herramientas y/o procesos que contribuyan a un mejor tratamiento de lixiviados, teniendo en cuenta la responsabilidad ambiental, social y los costos económicos que se incurran, para el manejo de estos residuos líquidos.

Por tanto, la propuesta de los humedales artificiales, también conocidos como construidos o de tratamiento (HT), se hace viable y asequible, puesto que éstos son sistemas de procesamiento de aguas residuales, diseñados específicamente para separar los contaminantes de las mismas y llevar a cabo el manejo y disposición de residuos de forma apropiada [5, p. 36]. Los humedales artificiales se han consolidado en las últimas décadas como una tecnología confiable y eficiente para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales, entre ellas las aguas residuales domésticas, industriales, drenajes ácidos de minas, desechos agrícolas y ganaderos, lixiviados de rellenos sanitarios, así como la degradación de compuestos orgánicos persistentes [5, p. 37]. Su uso está ampliamente extendido en diversos países europeos y de América del Norte, principalmente, en dónde se utiliza como tratamiento biológico secundario o terciario.

Este artículo tiene como objetivo proponer la implementación de un sistema de tratamiento secundario, sencillo, natural y amigable con el ambiente, que disminuya la carga contaminante de los lixiviados en el Relleno Sanitario “Parque Ecológico Reciclante”, generados por la recolección de basuras del municipio de Villavicencio, mediante humedales artificiales, por consiguiente, se presentarán las especies vegetales viables para el tratamiento de estos residuos líquidos, así como los criterios de diseño de este tipo de humedales.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamientos de depuración eficientes, autónomos y económicamente viables. Entre las soluciones más atractivas se encuentran los tratamientos que emulan los fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza. Estos sistemas se denominan tratamientos naturales de aguas residuales y cada día es más frecuente el uso de lagunajes, de técnicas de infiltración, de humedales artificiales de toda la variedad de sistemas, pues producen efluentes de buena calidad, al mismo tiempo que presentan bajos costos de inversión, operación y mantenimiento y no requieren personal altamente capacitado [6].

En el presente artículo se implementan dos tipos de investigación: *a) exploratoria*, puesto que ofrece un primer acercamiento al tema que se aborda y se pretende conocer, dando como resultado un panorama o conocimiento superficial del mismo, y *b) descriptiva*, que consiste en plantear lo más relevante de un hecho o situación concreta [7], para finalmente elaborar una propuesta como solución a un problema ambiental en el relleno sanitario “Parque Ecológico Reciclante” de Villavicencio. La metodología a utilizar en el desarrollo del artículo, será como se muestra en la Figura 1.

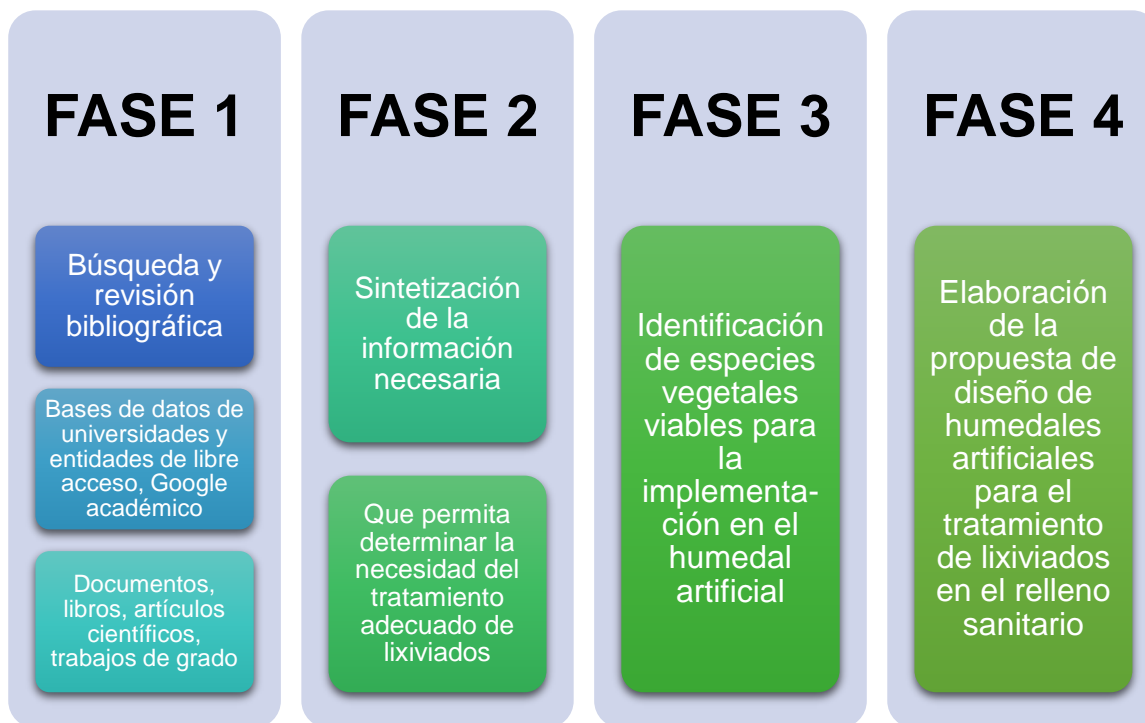


Fig. 1. Fases de la metodología.

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Lo anteriormente expuesto, concluye en la aplicación de humedales artificiales en el relleno sanitario “Parque Ecológico Reciclante” de la ciudad de Villavicencio, para aportar un valor añadido desde el punto de vista ambiental y paisajístico [8]. Se hace necesario resaltar que el uso de humedales para depurar aguas se ha incrementado durante los últimos veinte años y, actualmente, son una opción de tratamiento de aguas residuales reconocida y recomendada. Se ha demostrado que son efectivos en la reducción de la materia orgánica, para transformar y asimilar nutrientes y retienen y/o eliminan sustancias tóxicas que de otra manera serían vertidas sin tratamiento alguno al medio ambiente [6].

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido al gran riesgo que representan los lixiviados, tanto para la salud humana como para el medio ambiente, es de suma importancia implementar tratamientos adecuados para estos residuos en los rellenos sanitarios. Por este efecto, con el tiempo se han desarrollado diversos sistemas o procesos de tratamientos que controlan los residuos líquidos, estos van desde sencillos procesos biológicos hasta tecnologías avanzadas de filtración con membranas [9]. Así, el tratamiento biológico de los lixiviados es viable cuando el contenido de material orgánico biodegradable es elevado [10].

Por la naturaleza y composición de la corriente de lixiviado la normativa colombiana establece, a través de la Resolución 631 de 2015, regulatorio del Decreto 3930 de 2010, los valores absolutos de concentración de los diferentes contaminantes que teóricamente puede contener una corriente de lixiviados para poder ser descargada en un cuerpo de agua superficial. Esta nueva exigencia se establece en remplazo del anterior decreto regulatorio, el Decreto 1594 de 1984, a través del cual se exigía remociones del 80% de la carga contaminante afluente al sistema de tratamiento. Este hecho se convierte en un reto para todas las empresas operadoras de rellenos sanitarios [1, p. 3].

2.1. Área de estudio

Bioagrícola del Llano S.A. E.S.P. fue constituida el 17 de agosto de 1995 e inició operaciones el 1 de enero de 1996. La disposición final de residuos sólidos era entonces efectuada en la Granja Campoalegre. Posteriormente, fueron utilizados predios en el sector de Kirpas, luego de manera temporal en Rionegrito, y nuevamente en Kirpas. Allí, a partir del mes de enero de 1998, se adecuaron los terrenos pertenecientes a la

finca “Don Juanito”, con una extensión total de 20 hectáreas y en la cual la compañía dispuso los residuos sólidos de la ciudad hasta el 08 de enero de 2007 [11].

El Relleno Sanitario Don Juanito fue conocido a partir del año 2002, como el Parque Ecológico Reciclante, y le hizo merecedor a Bioagrícola del Llano SA ESP de premios y reconocimientos a nivel nacional [11].

Una vez agotada la capacidad técnica del Relleno Sanitario Don Juanito, se dio inicio a la operación en el predio ubicado en el Km 18 de la vía a Puerto Porfía, denominado Relleno Sanitario de Emergencia, que contó con una vida útil hasta diciembre de 2007. Durante ese año, la empresa de aseo adelantó los trámites necesarios para obtener la licencia ambiental que le permitiese ejecutar su proyecto de disposición final a 33 años, en este mismo sector [11].

Así, el 21 de diciembre de 2007 fue otorgada la Licencia Ambiental al Parque Ecológico Reciclante Relleno Sanitario de Villavicencio mediante resolución número 2.6.07.0982 de CORMACARENA, para el proyecto total a 33 años, en el cual se disponen actualmente los residuos sólidos de la ciudad [11].

Actualmente, la compañía cuenta con 162.054 usuarios a agosto de 2018, ofrece una cobertura de prestación del servicio del 99% del área urbana y 67% del área rural del municipio de Villavicencio [11]. En la Figura 2, se presenta una vista aérea de la zona donde se ubica el relleno sanitario “Parque Ecológico Reciclante” de la ciudad de Villavicencio.



Fig. 2. Ubicación del relleno sanitario “Parque Ecológico Reciclante”

Fuente: Google maps, 26 de octubre de 2018.

2.2. MANEJO ACTUAL DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO “PARQUE ECOLÓGICO RECICLANTE”

En éste, sitio de disposición final de residuos sólidos de la ciudad de Villavicencio, se reciben, en promedio, 60.480 m³/mes de aguas residuales; el proceso de estos lixiviados se lleva a cabo de la siguiente manera: se utilizan piscinas de almacenamiento con profundidad de 1.50 metros; la función de estas piscinas es remover el 80 % de sólidos, a través de un reactor que tiene un manto extendido de tipo granular que captura la materia orgánica. La campana trifásica separa el gas del sólido y el líquido pasa por una tubería de 4” que lleva el flujo hasta el tanque primario.

Adicional a ello, se emplean algunos mecanismos para remover ciertas sustancias: remoción de grasa, donde se utiliza el tanque de aforo y para los lixiviados, sedimentadores primarios.

Todos los lixiviados que se generan pasan por una tubería para purgar el flujo, depositándolo en una caja de inspección de 3 metros de diámetro, 6 metros de profundidad y 1800 litros; luego el flujo es bombeado a la piscina de contingencia con capacidad de 42,4 m³ en ésta se igualan todas las cargas contaminantes; la piscina cuenta con baffles que hacen que los lixiviados se muevan en cámaras, sedimentando los sólidos que tienen apariencia oscura, además presentan burbujas de gas (ácido sulfúrico, amoníaco). Esta piscina cuenta con un control biológico para minimizar malos olores.

Todas las aguas tratadas son vertidas, finalmente, al río Guatiquía.

2.3. HUMEDALES ARTIFICIALES

2.3.1. ANTECEDENTES

La utilización de humedales artificiales para la recepción de aguas residuales se remota a comienzos del siglo. Las ciénagas, humedales y turberas se concibieron como los mejores receptores de aguas residuales, pero además tenían un papel purificador importante [12].

El empleo de humedales de flujo sub-superficial para el tratamiento de las aguas residuales, tiene su origen en los trabajos de K. Seidel, del Max Planck Institute en Alemania, a comienzos de los años 50. En años, K. Seidel trabajó con R. Kickuth en el desarrollo de un sistema de tratamiento conocido como “Root Zone Method”, que operaba con flujo

sub-superficial horizontal, recurriendo al empleo de arcilla como sustrato filtrante [13, p. 15]. Siguiendo las directrices del Max Planck Institute, se construyó en 1974, en una localidad alemana, el primer humedal artificial europeo a escala real [13, p. 16].

El hecho de emplear, en los inicios de esta tecnología, como sustrato filtrante el propio suelo natural, provocó que un gran número de instalaciones construidas en los años 70 y 80 presentasen problemas operativos, como consecuencia de la colmatación de los sustratos, no cumpliéndose las expectativas propuestas [13, p. 16]. La situación se invirtió a comienzos de los 80, al comenzar a emplearse como media filtrante gravilla y grava, al objeto de garantizar la adecuada conductividad hidráulica y minimizar los riesgos de colmatación del sustrato, lo que condujo a un auge en la implantación de este tipo de tecnología [13, p. 16].

Los humedales construidos han sido ampliamente usados en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, como alcantarillados, aguas lluvias, aguas residuales industriales, escorrentía agrícola, drenaje ácido de minas, y lixiviados de rellenos sanitarios. Como sistemas naturales de tratamiento han mostrado tener una capacidad significativa tanto para el tratamiento de aguas residuales como para la recuperación de recursos [14]. No es exagerado decir, que todas las tecnologías conocidas para el tratamiento de aguas residuales se han probado para el tratamiento de los lixiviados de rellenos sanitarios [9].

En la ciudad de Villavicencio no se reporta la existencia de humedales artificiales, pero según CORMACARENA son cerca de 1.876 hectáreas de humedales las que hoy son declaradas como zona protegida en la ciudad. Entre ellas están los humedales: Coroncoro, Caracoli, Zuria, Charco, Aguas claras, Kirpas, Pinilla, La Cuerera y Calatrava.

2.3.2. TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Se han propuesto diversos diseños de humedales artificiales a lo largo de su desarrollo tecnológico; se consideran los siguientes tipos:

- **Sistema de agua superficial libre (SASL):** Estos sistemas consisten típicamente de estanques o canales, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente, y

agua en una profundidad relativamente baja (0,1 a 0,6 m) que atraviesa la unidad [15].

- **Sistemas de flujo bajo la superficie (SFBS):** Estos sistemas son similares a los filtros horizontales por goteo en las plantas de tratamiento convencionales. Se caracterizan por el crecimiento de plantas emergentes usando el suelo, grava o piedras como sustrato de crecimiento en el lecho del canal [15].

2.3.3. FUNCIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es el mecanismo detrás de los humedales artificiales para simular un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales. Algunos humedales artificiales logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial. Además, interactúan con la atmósfera [15].

Los humedales artificiales remueven los contaminantes a través de:
a) Proceso de remoción físico, **b)** Proceso de remoción biológico y **c)** Proceso de remoción químico [16].

En un análisis del estado del arte podemos conocer algunos humedales artificiales:

- En Villavicencio, área de estudio, solo se hallaron pruebas pilotos, porque no se llevó a cabo ningún proyecto.
- En Bogotá, hay claros ejemplos de humedales antrópicos, el más importante de ellos el Humedal El Salitre (Parque El Salitre), el cual fue aprobado como Parque Ecológico Distrital de Humedal. Posee un bosque, un espejo de agua y alrededor de 72 especies de aves, además permite que exista un cojín de agua que amortigüe la caída de esta, dando lugar a la cadena trófica y a la retención de los sedimentos que son el hábitat para diversas especies [17].
- Planta piloto en el centro de investigación IRTA, situado en Cabriels (Barcelona) con el objeto de evaluar su idoneidad a la hora de tratar este tipo de lixiviados y de optimizarlos. La planta

incluye seis (6) unidades de humedales artificiales de flujo subsuperficial (4.5 m² cada uno) construidas con cemento, bajo una estructura que los mantenía aislados de las condiciones meteorológicas. Se realizaron cuatro (4) experimentos consecutivos, diferentes en cuanto al tipo de fuente carbonada y a la dosis añadida (acetato sódico o metanol) para promover la desnitrificación del influente [18].

2.3.4. TECNOLOGÍA

Para el desarrollo de la propuesta se utilizaron los humedales artificiales que son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de *macrófitas* enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente [19, p. 7].

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante [19, p. 15]. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos [20].

La fitodepuración, en este caso, se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean éstos naturales o artificiales. El término *macrófitas*, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos [21]. Constituyen “fitosistemas”, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el tratamiento de las aguas [19, p. 16].

2.3.5. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

En la Figura 3 se presenta la clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.



Fig. 3. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.

Fuente: Elaboración propia, a partir de [19], 2018.

Los humedales enraizados son aquellos en los que la vegetación, por ejemplo, *Typha latifolia* (espadaña o junco), se encuentra plantada o fija en el sustrato que se coloca en el fondo del humedal. Los flotantes, consisten en estanques o canales de poca profundidad y en ellos, las plantas que se emplean no tienen raíz fija al sustrato, sino que se desarrolla una especie flotante, por ejemplo jacintos [22]. Los enraizados pueden ser de tres tipos: emergentes, sumergidos y flotantes [19], [5].

Los enraizados emergentes tienen una sub-clasificación de acuerdo al flujo de agua: flujo superficial y flujo sub-superficial. Los de flujo superficial (Figura 4), son aquéllos en los que, el agua circula sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. Mientras que, en los de flujo sub-superficial hay dos variantes, de flujo horizontal y de flujo vertical. La vegetación se planta

en el medio, que puede ser desde grava gruesa hasta arena. La profundidad del lecho va desde 0.45 a 1 m y tiene una pendiente característica de 0 a 5 %.

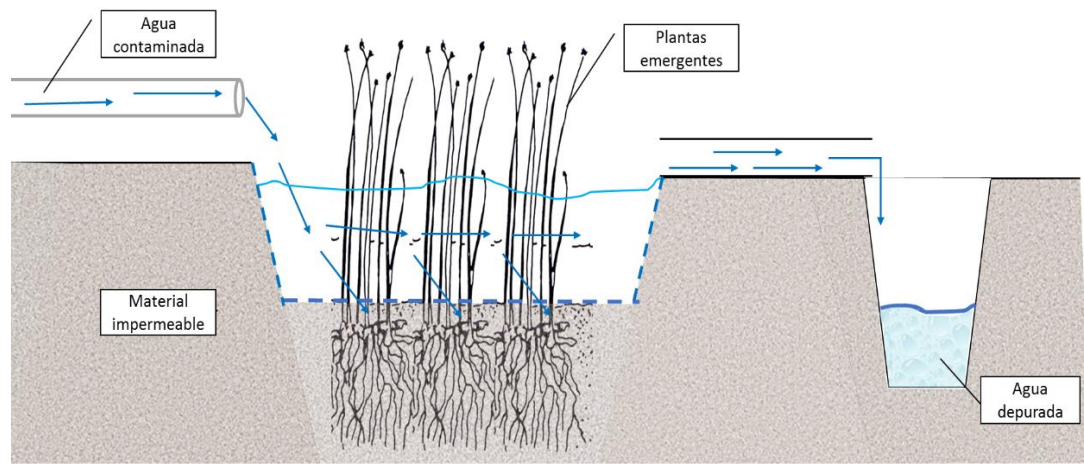


Fig. 4. Esquema de un humedal de flujo superficial.

Fuente: Tomado a partir de [5], 2018.

En los humedales de flujo sub-superficial horizontal (Figura 5a), el agua circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua al ser aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior, favoreciendo las condiciones anaerobias al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato [23], [19], [5]. En los de flujo sub-superficial vertical (Figura 5b), el agua circula verticalmente a través del sustrato de manera intermitente y en ellos se reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de conducción de agua, favoreciendo la aireación y condiciones aerobias [19], [5].

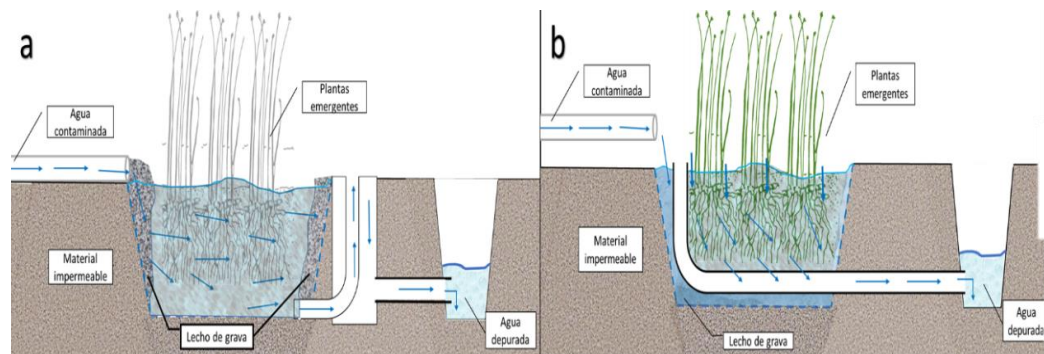


Fig. 5. Esquema simplificado de un humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal (a) y vertical (b).

Fuente: Tomado a partir de [5], 2018.

Los humedales contruidos de flujo sub-superficial vertical tienen la ventaja de que nitrifican, es decir, pasan el nitrógeno amoniacal a nitritos y nitratos y en algunos países este paso es requisito obligado en el tratamiento de aguas. Los humedales artificiales reproducen la dinámica de los humedales naturales, y como éstos, constituyen delicados ecosistemas, que combinan procesos físicos, químicos y biológicos en un medio diseñado, construido y manejado por el hombre. Es de vital importancia la actuación e interacción de los componentes vivos del sistema (microorganismos, hongos, algas, vegetación y fauna) y el agua residual a tratar [24], [25], [26]. El papel de la vegetación en la eficacia de los sistemas de tratamiento con macrófitas, ha sido ampliamente debatido en el ámbito científico. Es indudable que la vegetación en los humedales artificiales es un componente fundamental, ya que el sistema de tratamiento está estrechamente relacionado con un tipo determinado de vegetación. Por ejemplo, no pueden desarrollarse sistemas acuáticos si no se dispone de plantas flotantes [5].

Los sistemas basados en plantas enraizadas sumergidas, tienen el tejido fotosintético completamente embebido en el agua, pero generalmente las flores están expuestas a la atmósfera. Los dos tipos predominantes son elodea (*Elodea*, *Myriophyllum*, *Ceratophyllum*) e isoetáceas (*Isoetes*, *Littorella*, *Lobelia*) [23]. En los sistemas que utilizan plantas flotantes predominan el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna* spp).

La selección del tipo del humedal a emplear para una aplicación particular radica en la composición de las aguas residuales y el tipo de contaminante que desea removerse. En muchas ocasiones, se utiliza una combinación de diferentes tipos de humedales, sistemas conocidos como “híbridos” [5].

2.3.6. VEGETACIÓN

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación [27].

De acuerdo a Lara [28], las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

En la Figura 6 se presentan las plantas acuáticas más representativas y, generalmente, empleadas en los humedales artificiales, para la depuración de las aguas residuales.

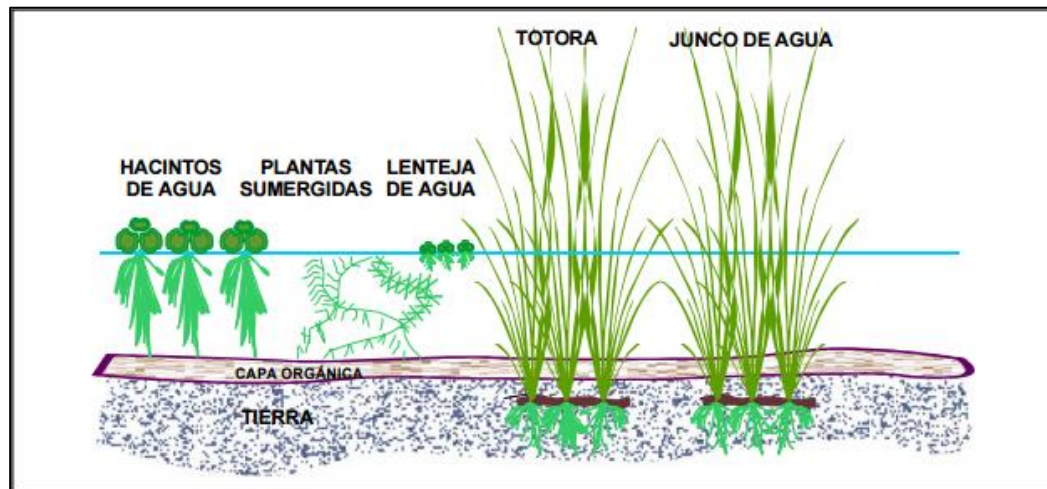


Fig. 6. Plantas acuáticas.

Fuente: Tomado a partir de [29], 2018.

Asimismo, en la Figura 7 se resumen las características de las tres (3) especies más utilizadas en los humedales artificiales:




Nombre Científico	Familia	Nombre (s) común (es)	Características sobresalientes	Distancia de siembra	Penetración de raíces en grava	Temperatura C		Salinidad	pH
						Deseable	Germinación de semillas	ppt	
<i>Thypha spp</i> 	Tifácea	Espadaña, Enea, Anea, Junco, Bayón, Bayunco, Bohordo, Henea, Junco de la pasión, Maza de agua	Ubicua en distribución Capaz de crecer bajo diversas condiciones medio ambientales Se propaga fácilmente Capaz de producir una biomasa anual grande Tiene potencial pequeño de remoción de N y P por la vía de la poda y cosecha.	60 cm	Relativamente pequeña (30 cm) por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	10-30	12-24	30	4 – 10
<i>Scirpus spp</i> 	Ciperácea	Totora	Perennes Crecen en grupo Plantas ubicuas Crecen en aguas costeras, interiores salobres y humedales Crecen bien en agua desde 5 cm hasta 3 m de profundidad	30 cm	60 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	18 -27		20	4 – 9
<i>Phragmites spp australis</i> más común 	Gramínea	Carrizo	Anuales Altos Rizoma perenne extenso Plantas acuáticas usadas más extensas Pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque sus rizomas penetran verticalmente y más profundamente. Son muy usadas en humedales porque ofrecen un bajo valor alimenticio	60 cm	40 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	12-23	10-30	45	2 – 8

Fig. 7. Características de las especies vegetales más utilizadas en humedales artificiales.

Fuente: Tomado a partir de [19], [28], 2018.

2.3.7. FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

En los humedales subterráneos de flujo, las aguas grises fluyen por el sistema bajo la superficie de tierra, lo cual elimina el riesgo de estancamiento y crecimiento de mosquitos, como se observa en la Figura 8. El sistema consiste en una capa delgada (5 cm) de arena cubierta por una capa gruesa (45-75 cm) de grava de tamaño pequeño-medio, y con una capa delgada (5 cm) tierra, ver Figura 9. Las plantas que sobreviven bien en los humedales naturales y contruidos (las aneas, las cañas, etc.) son plantados en la capa superficial del suelo y las raíces crecen en el sustrato de grava [30].

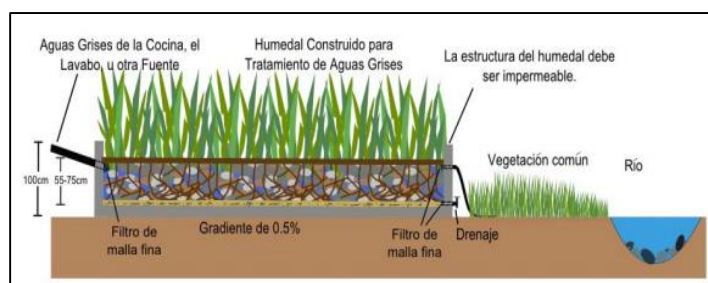


Fig. 8. Sistema subterráneo típico de humedales contruidos.

Fuente: Tomado a partir de [29], 2018.

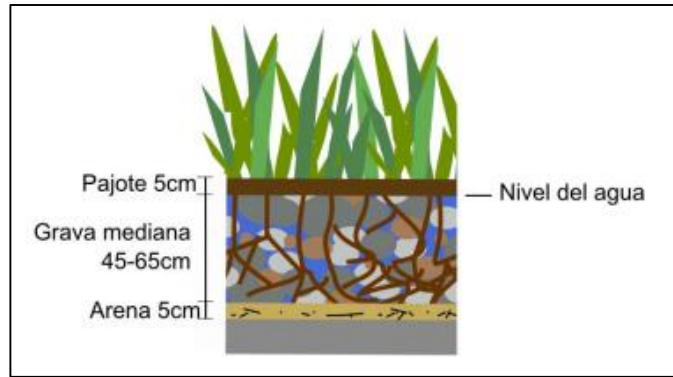


Fig. 9. Sección transversal de célula de humedal construido para el tratamiento de lixiviados.

Fuente: Tomado a partir de [29], 2018.

2.3.8. MATERIALES

Los humedales construidos para tratamiento de lixiviados pueden ser cimentados sobre la tierra o debajo de la tierra dentro de una celda de bloques de concreto u otro tipo de cubierta impermeable. El tamaño de la celda afecta el costo del sistema.

Se prevé utilizar: cemento, bloques de concreto, tubos (PVC o metal) para entrada y salida, malla fina de plástico, cubierta impermeable, válvula (para desaguar la célula), arena, grava, cubierta de paja y vegetación (de un humedal natural local), como lo muestra la Figura 10.

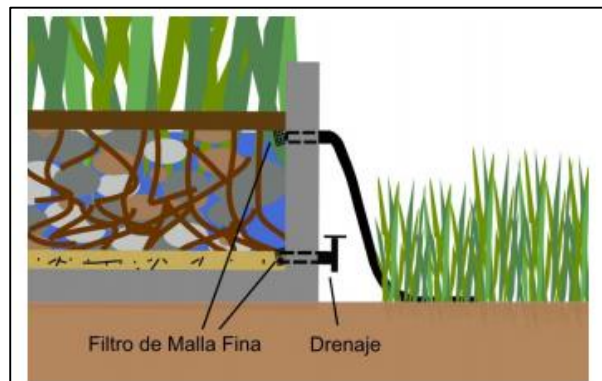


Fig. 10. Ilustración de los filtros de malla fina de plástico en las salidas.

Fuente: Tomado a partir de [29], 2018.

2.4. DATOS CUANTITATIVOS PARA LA PROPUESTA DE DISEÑO

Extensión de BIOAGRÍCOLA DEL LLANO S.A. E.S.P. → 33.202,28 Ha

Tabla 1. Datos de diseño para los humedales artificiales.

TIPO DE HUMEDAL	DATOS
Sistemas de flujo bajo la superficie (SFBS)	MEDIDAS DE 1 HUMEDAL <ul style="list-style-type: none"> • Largo → 2m • Ancho → 1m • Profundidad → 1m
	CAPACIDAD 2m ³ de Humedal → 270 L de agua depurada
	PROPUESTA DE DISEÑO 6 humedales artificiales → 1620 L de agua depurada
	PENDIENTE Se recomienda graduar el fondo de la celda para que tenga una inclinación de 0.5%
	PLANTAS (distancia de siembra) <ul style="list-style-type: none"> • Carrizos → 60 cm • Juncos → 60 cm • Totorá → 30 cm
	PLANTAS POR HUMEDAL 21

Fuente: Elaboración propia, 2018.

2.5. PROPUESTA DE DISEÑO

Los lixiviados recibidos en el Relleno Sanitario “Parque Ecológico Reciclante”, de Villavicencio, posterior a su tratamiento convencional, serán recolectados en una laguna de almacenamiento a través de una tubería de PVC de 12 pulgadas. El volumen de esta laguna será de 566,7396 m³, y sirve como un recipiente de sedimentación primario. El efluente de esta laguna será bombeado o, si está a desnivel, se llevará a través de un caudal a las celdas experimentales, a través de tuberías de PVC de 3 pulgadas que alimentan a dos (2) celdas, seguidas por otras dos (2) celdas finales. Los efluentes de las celdas finales serán conectados a una tubería de 4 pulgadas de PVC y bombeados o, si está a desnivel, se llevará a través de un caudal a una segunda laguna de almacenamiento [29].

En la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo de la posición relativa de la laguna de sedimentación del agua de entrada (influyente), celda de humedales artificiales y laguna del efluente.

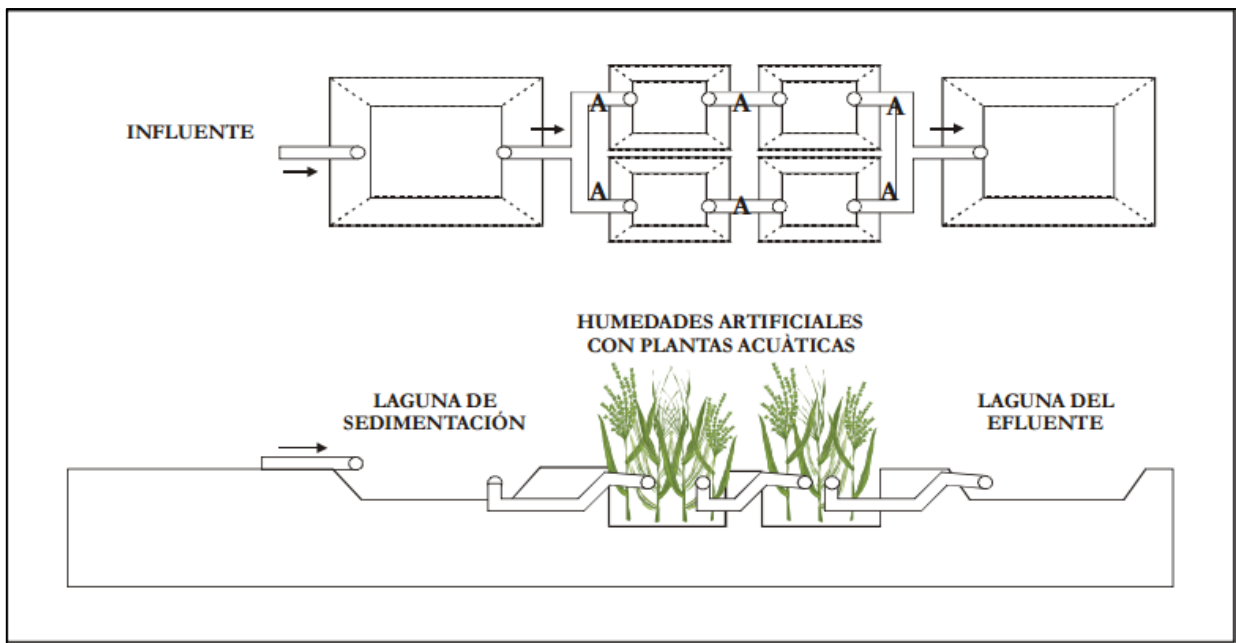


Fig. 11. Propuesta de diseño de los humedales artificiales en el “Parque Ecológico Reciclante”.

Fuente: Tomado a partir de [29], 2018.

3. CONCLUSIONES

Lo expuesto a lo largo del artículo permite abordar las siguientes conclusiones:

1. A partir de la revisión bibliográfica realizada en diversas fuentes, se corrobora la viabilidad de utilizar los humedales artificiales para el tratamiento de los lixiviados que se reciben en el relleno sanitario “Parque Ecológico Reciclante”, producto de la recolección de basuras de la ciudad de Villavicencio, debido a la simplicidad del sistema y a la amplia capacidad de depuración, a causa de los procesos naturales para tratar el agua residual.
2. Asimismo, se determina la necesidad del tratamiento adecuado de lixiviados en el relleno sanitario “Parque Ecológico Reciclante”, a partir de información suministrada por BIOAGRÍCOLA DEL LLANO S.A. E.S.P. y su proceso actual para el manejo de estas aguas residuales; también se determinan datos cualitativos y cuantitativos sobre humedales artificiales, que facilitan la propuesta de diseño de los mismos. Además de ello, se afirma que la utilización de humedales artificiales es una solución adecuada, de forma complementaria al tratamiento que realiza la ciudad de Villavicencio, pues genera menos costes de explotación y de mantenimiento, en tanto que la producción de olores será mínima debido a un sistema de flujo subsuperficial

que estará perfectamente integrado en el medio natural, ofreciendo un valor añadido a nivel paisaje.

3. Posteriormente, se identifican las especies vegetales viables para la implementación en los humedales artificiales, teniendo en cuenta el tipo de humedal, y se proponen las más utilizadas en éstos, para que el sistema realice su funcionamiento de manera eficiente en el relleno sanitario de la ciudad de Villavicencio.
4. Por último, con toda la información sintetizada y analizada, se proponen las medidas de los humedales artificiales, teniendo en cuenta los aspectos y factores ambientales del lugar.

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque derrama en mí todas las bendiciones, dones y carismas necesarios para hacer de mi vida lo que él quiere.

A mis padres quienes contribuyeron con el aporte económico.

A la Universidad que me abrió sus puertas y me aceptó en sus aulas para mejorar mis conocimientos como Ingeniera Ambiental y alcanzar una nueva meta.

A mi tutora, Ximena Lucía Pedraza Nájar, docente y directora del Seminario de Investigación, por su direccionamiento y apoyo en la investigación y elaboración del presente artículo científico.

REFERENCIAS

- [1] N. d. J. G. Hoyos, «Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia,» 7 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/58039/>. [Último acceso: 21 Agosto 2018].
- [2] H. F. C. Roa, «Repositorio Universidad de la Salle,» 8 Abril 2006. [En línea]. Available: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14909/T41.06%20C891p.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 20 Agosto 2018].
- [3] G. M. P. Martínez, «Repositorio Universidad de los Andes de Colombia,» 20 Mayo 2007. [En línea]. Available: https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lz

XzlwMDdfc2VndW5kb19zZW1lc3RyZS8wMDAwMzE1Mi5wZGY%3D.
[Último acceso: 21 Agosto 2018].

- [4] Buenaventura y S. Vega, «BioAgrícola del Llano S.A. E.S.P.,» 22 Abril 2007. [En línea]. Available: www.bioagricoladelllano.com.co. [Último acceso: 22 Agosto 2018].
- [5] M. T. Alarcón Herrera, F. Zurita Martínez, J. A. Lara-Borrero y G. Vidal, Humedales de tratamiento: alternativas de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina, Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2018.
- [6] C. A. Arias, «Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, n° 13, pp. 17-24, 2014.
- [7] Universia, «Portal Universia S.A.,» Fundación Universia, 4 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <http://universia.cr/educacion/2017/09/04/1155475/tipos-investigacion-descriptiva-exploratoria-explicativa.html>. [Último acceso: 13 Septiembre 2018].
- [8] D. T. Naturalea, «Naturalea,» Naturalea Conservación, S.L., 15 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.naturalea.eu/es/inicio/>. [Último acceso: 13 Septiembre 2018].
- [9] E. Giraldo, «Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes,» *Revista de Ingeniería*, n° 18, pp. 40 - 50, 2015.
- [10] P. Torres-Lozada, «Impacto de la incorporación de lixiviados en el arranque de reactores anaerobios al tratar aguas residuales domésticas,» *Ingeniería y Universidad*, vol. 14, n° 2, pp. 313 - 326, 2010.
- [11] «Bioagrícola del Llano,» EMZAC, [En línea]. Available: <http://www.bioagricoladelllano.com.co/index.php?sec=9>. [Último acceso: 15 Septiembre 2018].
- [12] Sociedad Quebequense de Tratamiento de Aguas Residuales Canadá, Estudios técnicos de sustitución aplicables al saneamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades : sistema de tratamiento de aguas servidas por medio de Humedales Artificiales, Bogotá: Organización Panamericana de la Salud, 1999.
- [13] J. J. Salas Rodríguez, J. R. Pidre Bocado y L. Sánchez Fernández, Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales, Sevilla: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua, 2007.

- [14] Y. Lei, C. Hui-Ting y L. H. Mong-Na, «Nutrient removal in gravel – and soil based wetland microcosms with and without vegetation,» *Ecological Engineering*, vol. 18, nº 18, pp. 91- 105, 2001.
- [15] M. Akinyi Abira, *A Pilot Constructed Treatment Wetland for Pulp and Paper Mill Wastewater: Performance, processes and implications for the Nzoia River, Kenya*, Delft: Taylor & Francis/Balkema, 2008.
- [16] A. Guido-Zárate y C. Durán-de-Bazúa, «Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio,» *Tecnología, Ciencia, Educación*, vol. 23, nº 1, pp. 15-22, 2008.
- [17] L. Moreno, «Humedal El Salitre, Humedales antrópicos, Humedales artificiales, Humedales Bogotá,» *Fundación Humedales Bogotá*, 15 Marzo 2012.
- [18] C. Miguel, *Humedales artificiales para la depuración de lixiviados de diferentes orígenes*, Pamplona: iagua, 2013.
- [19] Ó. Delgadillo, A. Camacho, L. F. Pérez y M. Andrade, *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*, Cochabamba: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua, 2010.
- [20] P. Kolb, *Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós*, Vienna: Universitat für Bodenkultur, 1998.
- [21] J. e. a. Fernández, *Manual de fitodepuración*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
- [22] J. Celis Hidalgo, J. Junod Montano y M. Sandoval Estrada, «RECIENTES APLICACIONES DE LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS,» *Theoria*, vol. 14, nº 1, pp. 17-25, 2005.
- [23] M. Del Bubba, C. Arias y H. Brix, «Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds as measured by the Langmuir isotherm.,» *Water Res.*, vol. 37, pp. 3390-3400, 2003.
- [24] C. Arias, H. Brix y E. Marti, «Recycling of treated effluents enhances removal of total nitrogen in vertical flow constructed wetlands.,» *J. Environ. Sci. Health. A. Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.*, vol. 40, pp. 1431-1443, 2005.
- [25] C. Arias y H. Brix, «Phosphorus removal in constructed wetlands: can suitable alternative media be identified?,» *Water Sci. Technol.*, vol. 51, pp. 267-273, 2005.

- [26] H. Brix y C. Arias, «The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines.,» *Ecol. Eng.*, vol. 25, pp. 491-500, 2005.
- [27] O. Arias, Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales contruidos de flujo, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [28] J. Lara B., Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya. Instituto Catalán de Tecnología, 1999.
- [29] W. A. Llagas Chafloque y E. Guadalupe Gómez, «Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM,» *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, vol. 15, nº 17, pp. 85-96, 2006.
- [30] D. Yocum, «Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de Lixiviados por Biofiltración,» Bren School of Environmental Science and Management. University of California, Santa Barbara, 2012.